

## WYKORZYSTANIE MODELI DIAGNOSTYCZNYCH WE WSPARTYCH ANALIZĄ RYZYKA PROCEDURACH UTRZYMANIA MASZYN

Stanisław RADKOWSKI, Maciej ZAWISZA

Instytut Podstaw Budowy Maszyn PW  
ul. Narbutta 84, 02-524 Warszawa, ras@simr.pw.edu.pl

### Streszczenie

Współczesne propozycje rozwiązań techniczno-organizacyjne oprócz zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa dodatkowo uwzględniają rozwój i aplikację technologii samoutrymania przy zachowaniu wysokiej efektywności produkcji i możliwie niskich kosztach eksploatacji. Stąd analiza ryzyka i zmniejszenie niepewności oszacowań niezawodności stały się krytycznymi metodami w procesie podejmowania decyzji strategicznych, których celem jest zapewnienie bezpieczeństwa technicznego i minimalizacja kosztów. Praktyka inżynierska jak i wyniki badań naukowych wskazują, że okres występowania większości uszkodzeń w systemach technicznych jest słabo skorelowany z czasem eksploatacji, co w efekcie nie pozwala spełnić wymagań stawianych systemom utrzymania drogiego systemów technicznych przy utrzymaniu wysokiej gotowości. Czynnikiem warunkującym uzyskanie poprawnego rozwiązania jest możliwość prognozowania rozwoju uszkodzenia z uwzględnieniem modelu degradacji systemu.

Słowa kluczowe: analiza bezpieczeństwa i ryzyka technicznego, diagnostyka wibroakustyczna.

### USE OF DIAGNOSTIC MODELS IN THE RISK ANALYSIS SUPPORTED MAINTENANCE PROCEDURES FOR MACHINES

#### Summary

Apart from ensuring the relevant safety levels, the contemporary proposals of technical-and-organizational solutions also account for the development and application of self-maintenance technologies while keeping production efficiency high and operating costs possibly low. Hence risk analysis and reduction of uncertainty of estimates concerning reliability have become the critical methods in the process of making strategic decisions whose goal is to ensure technical safety and minimize the costs. Engineering practice and results of scientific research show that there is no strong correlation between the period of occurrence of majority of defects in technical systems and the duration of their operation, which as a result prevents fulfillment of the requirements set for the maintenance systems used in expensive technical systems if high readiness is required. The ability to reach the correct solution depends on the possibility of forecasting the development of defects while accounting for the model of system degradation.

Keywords: safety and risk analysis, vibroacoustic diagnostic.

## 1. WPROWADZENIE

Osiągnięcie konkurencyjnego poziomu efektywności produkcji we współczesnym świecie jest silnie skorelowane z zapewnieniem odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Wyższa jakość produkcji, większa niezawodność i gotowość systemów produkcyjnych i transportowych, optymalizacja kosztów, również właściwy dobór strategii i procedur obsługi i napraw to obecnie główne problemy do rozwiązania w dziedzinie eksploatacji. Równocześnie ocenia się, że około 40% ogólnych kosztów produkcji to koszty eksploatacji. Stąd, przyjęcie strategii eksploatacyjnej zapewniającej osiągnięcie założonego celu, w tym poziomu bezpieczeństwa technicznego stało się jednym z podstawowych zagadnień zarządzania

systemami technicznymi i transportowymi. Dotychczas stosowane strategie eksploatacji miały na celu, szczególnie w stosunku do obiektów o dłuższym okresie użytkowania utrzymanie założonego poziomu bezpieczeństwa.

Współczesne propozycje rozwiązań techniczno-organizacyjne [1] dodatkowo uwzględniają rozwój i aplikację technologii samoutrymania przy zachowaniu wysokiej efektywności produkcji i możliwie niskich kosztach eksploatacji.

Stąd analiza ryzyka i zmniejszenie niepewności oszacowań niezawodności stały się krytycznymi metodami w procesie podejmowania decyzji strategicznych, których celem jest zapewnienie bezpieczeństwa technicznego i minimalizacja kosztów.

## 2. WYKORZYSTANIE ANALIZY RYZYKA W PODEJMOWANIU DECYZJI EKSPLOATACYJNYCH

Zarówno w Europie jak i w Ameryce za najbardziej efektywne metody uznano *RBI* (Risk Based Inspection) – nadzór wsparty analizą ryzyka oraz *RBM* (Risk Based Maintenance) – eksploatacja zorientowana na bezpieczeństwo. W metodach *RBI* i *RBM* odwołujących się do identycznych pojęć i sposobów opisu systemu, podsystemów, podobnej klasyfikacji, funkcjonalnych uszkodzeń i rodzajów uszkodzeń jak w metodzie *RCM* (niezawodnościowo zorientowanej eksploatacji) podejmowane są próby obliczenia ryzyka, w odróżnieniu od metody *RCM*, w której celem jest określenie stopnia (klasy) krytyczności analizowanego obiektu lub elementu.

W metodzie *RCM* dążymy do zakwalifikowania rodzaju uszkodzenia do określonej klasy, przypisując równocześnie wszystkim rodzajom uszkodzeń danej klasy to samo znaczenie i rozległość konsekwencji.

Taki sposób postępowania można przyjąć za satysfakcjonujący jedynie wówczas, gdy wartość strat jest mała i wystarczy jedynie uwzględnić prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niepożądanego. Podstawą obliczeniową poziomu ryzyka w metodach *RBI* i *RBM* jest jego definicja, zgodnie z którą jest to oczekiwana wartość prawdopodobnej przyszłej straty określona przez iloczyn prawdopodobieństwa zdarzenia niepożądanego i możliwych konsekwencji.

Uwzględniając rozrzut ocen czasu do wystąpienia awarii, głównym celem metod predykcji wspartych analizą ryzyka jest zmniejszenie niepewności prognozy. Jednym z istotnych sposobów rozwiązania tego problemu jest modelowanie i diagnozowanie procesów degradacyjnych i zmęzeniowych, tym samym zmniejszenie wariancji ocen residualnego życia obiektu.

Realizacja tego celu wymaga oceny strukturalnej niezawodności systemu z uwzględnieniem detekcji i analizy procesów degradacji wszystkich składowych w uprzednim i aktualnym okresie użytkowania. Na tej podstawie możliwe jest zmniejszenie niepewności odnośnie oceny okresy czasu do awarii oraz prognozy wystąpienia i rozwoju innych typów uszkodzeń.

Takie ujęcie wymaga dostępu do odpowiedniej bazy danych o możliwych uszkodzeniach składowych systemu oraz wiedzy zgromadzonej na podstawie doświadczeń zdobytych przez odpowiednio przygotowanych pracowników. Ogólnie w omawianej metodzie wyróżnia się następujące etapy:

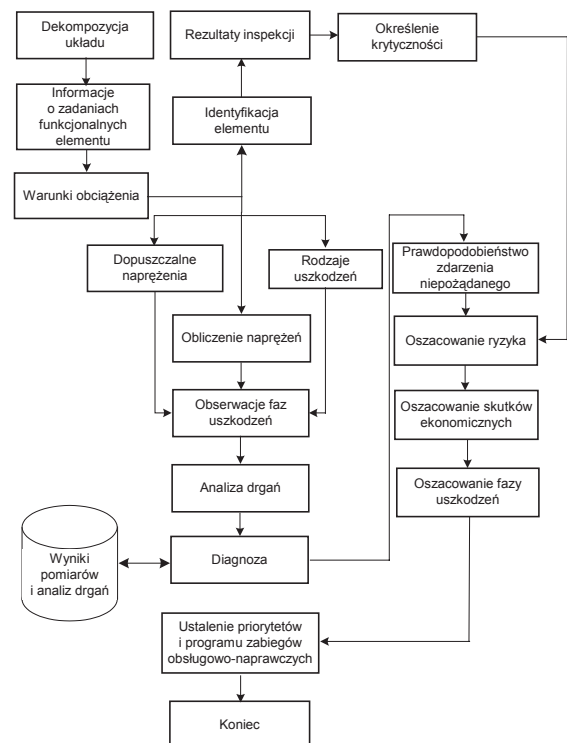
1. Dekomponowanie analizowanego systemu na podukłady i elementy a następnie oszacowanie i ich krytyczność w najbardziej niekorzystnych scenariuszach zdarzeń.
2. Określenie czasu i zakresu kolejnej inspekcji.

3. Oszacowanie poziomu ryzyka każdego podukładu i elementu.
4. Wyznaczenie priorytetów utrzymania elementów zgodnie z ustalonym rankingiem poziomu ryzyka technicznego.

Ogólnie, ocena ryzyka powinna uwzględniać każdy rodzaj uszkodzenia, którego wystąpienia można oczekiwać, odnośnie poszczególnych elementów i podzespołów i obejmować zarówno oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzenia jak rozległości i wysokości strat (konsekwencji). Procedury estymacji prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego powinny uwzględniać rzeczywisty stan rozwoju uszkodzenia, ważniejsze uszkodzenia, rezultaty inspekcji i możliwe przyszłe uszkodzenia.

Podobnie oszacowania powinny uwzględniać zarówno aspekty bezpieczeństwa jak i zagadnienia strat ekonomicznych spowodowanych uszkodzeniami wtórnymi, w tym koszty napraw, straty spowodowane przerwą w produkcji i wypłatą rekompensat za utracone zdrowie lub życie.

Otrzymane rezultaty oszacowań ryzyka powinny być zestawione w postaci macierzy ryzyka, która w naturalny sposób pozwala określić kategorie scenariuszy i ustalić priorytety. Schemat przedstawiający możliwość zastosowania metody *RBI* wspartej diagnostyką wibroakustyczną zaprezentowano na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat procedury *RBI* wspartej diagnostyką wibroakustyczną

### 3. DIAGNOZOWANIE WCZESNYCH FAZ ROZWOJU USZKODZEŃ JAKO ELEMENT ANALIZY RYZYKA

Praktyka inżynierska jak i wyniki badań naukowych wskazują, że okres występowania większości uszkodzeń w systemach technicznych jest słabo skorelowany z czasem eksploatacji.

W efekcie, konwencjonalne strategie nie są w stanie spełnić wymagań stawianych systemom utrzymania drogich systemów technicznych, od których na dodatek oczekuje się wysokiej gotowości.

Czynnikiem warunkującym uzyskanie poprawnego rozwiązania jest możliwość prognozowania rozwoju uszkodzenia z uwzględnieniem modelu degradacji systemu.

Badania nad wykorzystaniem modelowo wspartej diagnostyki wibroakustycznej w badaniu i symulacji procesów zmęczenia i destrukcji [2,3] wskazują na możliwość wykorzystania takiego ujęcia w zadaniach mających na celu zwiększenie niezawodności elementów i zespołów maszyn, a w konsekwencji zmniejszenia niepewności w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych.

Równocześnie istniejący stan wiedzy diagnostycznej pozwala nie tylko sformułować diagnozę stanu technicznego i wykryć okres kumulacyjnego zużycia, ale z powodzeniem podejmować zagadnienie diagnozowania wczesnych faz rozwoju procesów degradacyjnych i zmęceniowych. Należy podkreślić, że wiele elementów układów napędowych pojazdów, maszyn roboczych i statków powietrznych, podlega procesowi degradacji wskutek erozji, tarcia, tłumienia wewnętrznego czy powstawania pęknięć. Można wymienić szereg takich elementów w tym podzespoły silników, przekładni zębatych, układów zaworowych i podobnych. Różnorodność zjawisk, sposobów kodowania informacji diagnostycznej oraz wielość nośników informacji przyczyniły się do opracowania zróżnicowanych procedur diagnostycznych.

Elementem, który w dalszym ciągu, mimo wielu osiągnięć w niezadowalającym stopniu jest rozwiązany to zagadnienie sformułowania prognozy okresu do wystąpienia katastroficznego uszkodzenia.

Najprostszy podział metod prognozowania na podstawie sygnałów wibroakustycznych uwzględnia dwie grupy, metody symptomowe i wsparte modelowo. W metodach symptomowych zakłada się, że głównym źródłem informacji, pozwalającej głębiej zrozumieć proces degradacji systemu są rezultaty pomiarów wejścia i wyjścia układu.

Przyjmując, że statystyczne charakterystyki danych nie zmieniają się dopóty, dopóki w systemie nie wystąpią zdarzenia zakłócające jego zdolność, problem sprowadza się do wykrycia diagnostycznym istotnej zmiany wywołanej uszkodzeniem i opracowania zależności wyznaczającej osiągnięcie wartości progowej w funkcji czasu. Metody

symptomowe wykorzystują statystyczne i uczące techniki poczynając od teorii rozpoznawania obrazów, metod statystyki wielowymiarowej (na przykład statycznej i dynamicznej analizy składowych głównych PCA) liniową i nieliniową analizę dyskryminacyjną, po metody analizy czarnej skrzynki z wykorzystaniem sieci neuronowych, samoorganizujących się w funkcji cech oraz systemów o rozmytych strukturach.

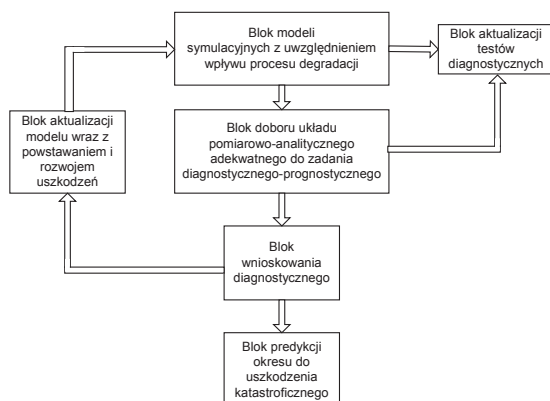
Dla scharakteryzowania najciekawszych kierunków warto podać kilka przykładów. I tak w pracy [4] jako możliwość prognozowania rozwoju uszkodzenia w przekładni zębatej wskazuje się śledzenie zmian parametrów sygnału drganiowego, opisywanego przez zmieszanie rozkładów gaussowskich. W pracy [5], mimo że parametry AR nie mają fizycznego sensu, wskazuje się na ich użyteczność w prognozowaniu zmian temperatury w turbinie gazowej. Z kolei w pracy [6] przedstawiono metodę DWNN (*dynamic wavelet neural network*), w której sieć jest trenowana przy użyciu sygnałów wibroakustycznych uszkodzonych łożysk o różnej wielkości uszkodzeń. Pozwala to użyć jej do predykcji ewolucji pęknięcia z uwzględnieniem zmęceniowego zniszczenia włącznie. Główną zaletą metod symptomowych jest ich zdolność transformowania wielowymiarowych zaszurowanych danych w informacje diagnostyczną o zredukowanym wymiarze przydatną w procesie wnioskowania diagnostyczno-prognostycznego [7]. Istotną wadą tego sposobu postępowania jest duża zależność efektywności rozwiązania od jakości układu akwizycji danych wejścia-wyjścia.

### 4. WYKORZYSTANIE ESTYMACJI BAYESOWSKIEJ W USZKODZENIOWO ZORIENTOWANYCH MODELACH DIAGNOSTYCZNYCH

W metodach prognozowania modelowo wspartych zakłada się, że jest dostępny dokładny model matematyczny, który ujmuje zarówno jakościowy jak i ilościowy wpływ procesów destrukcji i zmęczenia na częstotliwościową strukturę sygnału wibroakustycznego. Stosując analizę porównawczą pomiędzy rezultatami symulacji z wykorzystaniem modelu matematycznego opisującego układ bez uszkodzeń i wynikami pomiarów prowadzonych na rzeczywistym obiekcie otrzymujemy cechy diagnostyczne (residua), które stanowią podstawę do sformułowania diagnozy. Natomiast dysponując modelem uwzględniającym proces destrukcji jesteśmy w stanie sformułować wiarygodną prognozę czasu do wystąpienia katastroficznego uszkodzenia z wyprzedzeniem, niezbędnym z punktu widzenia efektywnej eksploatacji. Do wyznaczania wartości progowych wykorzystuje się techniki statystyczne. Jest wiele technik wyznaczania residuów, poczynając od zastosowania filtrów Kalmana [8] poprzez modele kumulacji uszkodzeń [9,10].

Podstawową zaletą metod modelowo wspartych jest ich zgodność fizyczna układu i procesu degradacji, co w efekcie prowadzi do tego, że wektory cech są ściśle związane z parametrami modelu. Dodatkowo, należy podkreślić, że pogłębienie wiedzy odnośnie procesu degradacji, może być adaptowane w modelu i przyczynić się do wzrostu dokładności rozwiązania rozważanego zadania.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy proponowanego modelowo wspartego procesu prognozowania.



Rys. 2. Schemat blokowy inteligentnego układu diagnostyczno-prognostycznego

Istota bloku modelowania i symulacji polega na stworzeniu możliwości wprowadzenia uaktualnionych charakterystyk diagnostycznych ujmujących zależność pomiędzy zmianą parametrów diagnostycznych, a powstaniem i rozwojem uszkodzenia. Do tego celu wykorzystana jest metoda modelowania hybrydowego polegająca na łączeniu ilościowych modeli symulacyjnych z przy czynowymi modelami określającymi związku typu *uszkodzenie-skutek*. Pozwalają one określić skutki występowania uszkodzeń, opisać fizyczne zmiany zachowania się obiektu i dobrać metody statystyczne oraz techniki uczenia modeli, które będą w stanie uwzględnić wpływ rozwoju uszkodzeń na zachowanie się systemu i jego poszczególnych składowych.

Istotną rolę w realizacji tak pomyślanego procesu adaptacji modeli symulacyjnych spełniają bloki doboru układów pomiarowo-analizujących oraz blok aktualizacji modelu. W pierwszym na podstawie ciągłej oceny efektywności podejmowane są decyzje odnośnie użycia dodatkowych czujników lub wykorzystania redundancji analitycznej. Dodatkowo oceniana jest skuteczność prowadzonych testów w wykrywaniu i śledzeniu rozwoju uszkodzeń. Wspomniana ocena z jednej strony uwzględnia kryterium minimalizacji fałszywych alarmów, z drugiej poprawę zdolności wykrywania trendów degradacyjnych oraz analizy stopnia zagrożenia uszkodzenia katastroficznego wspomagającego uruchomienie procedur ostrzegania.

W bloku wnioskowania następuje synteza rezultatów przeprowadzonych pomiarów w celu oszacowania stanu technicznego diagnozowanego obiektu i przekazania odpowiednich danych do systemu nadzoru eksploatacji. W przypadku układu *on-board* blok wnioskowania przygotowuje i przekazuje dane do stacji obsługowo – naprawczej w celu umożliwienia szybkiej identyfikacji wymiennych komponentów układu oraz zakresu czynności naprawczych. Równoległe blok uruchamia gałąź sprzężenia zwrotnego w każdym przypadku, gdy sygnatura uszkodzenia nie jest rozpoznawana jako jedna z dotychczas ustalonych i wprowadzonych do modelu symulacyjnego zależności *uszkodzenie-skutek*. Powoduje to uruchomienie procedur identyfikacji nowej relacji uszkodzeniowej w celu uaktualnienia macierzy diagnostycznej.

Otrzymane w efekcie adaptacyjnych procedur wnioskowania informacje diagnostyczne i sformułowane diagnozy są w połączeniu z odpowiednią częścią danych menedżerskich wykorzystywane w bloku predycyjnym do określenia prognozy okresu do wystąpienia katastroficznych uszkodzeń krytycznych składowych systemu.

Przykładem możliwości takiego ujęcia jest wykorzystanie modelu symulacyjnego opracowanego w Pracowni Wibroakustyki w badaniach zmęczeniowych wyłamania zęba [11].

Jako test diagnostyczny z uszkodzeniowo zorientowaną miarą przyjęto zmianę rozkładu prawdopodobieństwa amplitud widma generowanego przez parę kół zębatych w postaci zależności [12]:

$$D = C_1 \left( 1 - \frac{K(\theta)}{K(\theta_0)} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$$C_1 = \frac{K(\theta)}{(K(\theta_0) - K(\theta_f))} \quad - \quad \text{czynnik}$$

skalujący, natomiast  $K(\theta)$  oznacza informacyjną miarę zmienności rozkładu prawdopodobieństwa (2)

przy czym gdy  $K(\theta) = K(\theta_f)$  wówczas  $D = 1$ , natomiast gdy  $K(\theta) = K(\theta_0)$  to  $D = 0$ .

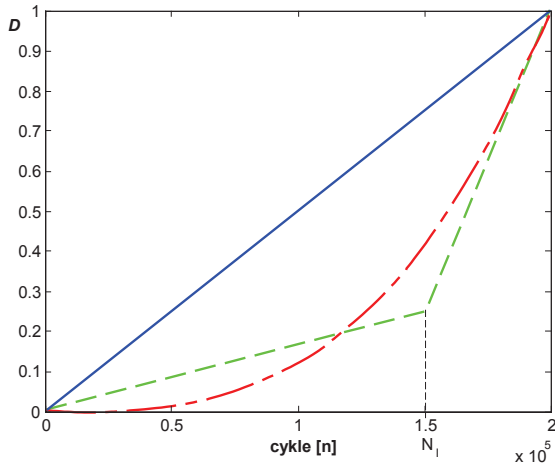
Korzystając z modeli analogicznych do stosowanych w mechanice zmęczeniowego zniszczenia i metod prognozowania okresu zmęczeniowego zużycia łożysk, zasadę kumulacji uszkodzeń ze względu na przyjętą miarę rozwoju pęknięcia określono jak następuje (Rys. 3):

$$D = \frac{N}{N_f} \quad - \quad \text{dla liniowej zasady}$$

kumulacji; (3)

$$D = \left( \frac{N}{N_f} \right)^q \quad - \quad \text{dla akumulacji opisaney}$$

krzywą; (4)



Rys. 3. Wibroakustyczne modele diagnostyki zmęczeniowego wyłamania zęba w przekładni zębatej

$$D = \lambda \frac{N}{N_I} \quad - \text{ dla fazy inicjacji pęknięcia}$$

w modelu kumulacji opisanego dwoma odcinkami prostej; (5)

$$D = 1 + \frac{(1-\lambda)}{N_I - N_{II}} (N - N_{II}) \quad - \text{ dla}$$

fazy propagacji pęknięcia w modelu kumulacji opisanego dwoma odcinkami prostej. (6)

gdzie:

- $N$  – liczba cykli dla danej próby;
- $N_f$  – liczba cykli do wystąpienia awarii;
- $q$  – wykładnik zależny od właściwości materiału i struktury;
- $N_I$  – liczba cykli do wystąpienia inicjacji;
- $N_{II}$  – liczba cykli odpowiadająca fazie propagacji, przy czym  $N_I + N_{II} = N_f$ ;
- $\lambda$  – współczynnik uszkodzenia występującego przy  $N_I$  liczbie cykli.

Korzystając z równania (1) oraz zależności (3÷6) otrzymamy odpowiednio:

$$\frac{K(\theta)}{K(\theta_0)} = 1 - \frac{1}{C_1} \frac{N}{N_f} \quad (7)$$

$$\frac{K(\theta)}{K(\theta_0)} = 1 - \frac{1}{C_1} \left( \frac{N}{N_f} \right)^q \quad (8)$$

$$\frac{K(\theta)}{K(\theta_0)} = 1 - \lambda \frac{1}{C_1} \frac{N}{N_f} \quad (9)$$

$$\frac{K(\theta)}{K(\theta_0)} = 1 - \frac{1}{C_1} \left( 1 + \frac{(1-\lambda)}{N_I - N_{II}} \right) (N - N_{II}) \quad (10)$$

Zauważmy, że przy takim ujęciu i wprowadzeniu do modelu symulacyjnego parametrów opisujących degradację warunków współpracy w węzle kinematycznym oraz degradację właściwości materiałów staje się możliwe wyróżnienie okresu inicjacji, a następnie przejście do etapu prognozowania fazy propagacji pęknięcia. Głównym problemem w efektywnym aplikowaniu przedstawionego ujęcia jest zmniejszenie

niepewności odnośnie wartości parametrów aposteriorycznego rozkładu prawdopodobieństwa. Z tego względu wydaje się, że naturalnym uzupełnieniem procedur wykorzystywanych w metodach *RBI* i *RBM* powinna być bayesowska metoda estymowania parametrów rozkładu a posteriori.

Założmy, że  $\alpha$  jest wektorem nieznanymi parametrów a  $y$  wektorem obserwacji. Najważniejsza różnica pomiędzy klasycznym ujęciem a podejściem bayesowskim polega na tym, że jeśli wcześniej zakładano możliwość estymowania nieznanymi wartości parametrów rozkładu, tym razem nieznanymi parametry są zmiennymi losowymi. Rozkład a posteriori  $p(\alpha/y)$  zgodnie ze wzorem Bayesa otrzymujemy na podstawie funkcji wiarygodności  $p(y/\alpha)$  oraz apriorycznego rozkładu  $p(\alpha)$ :

$$p(\alpha/y) = \frac{p(y/\alpha)p(\alpha)}{\int p(y/\alpha)p(\alpha)d\alpha} \propto p(y/\alpha)p(\alpha) \quad (11)$$

Zwykle w analizie bayesowskiej przyjmuje się, że aprioryczny rozkład Jeffreya [13], który otrzymuje się stosując regułę, że gęstość rozkładu apriorycznego jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego wyznacznika macierzy Fishera:

$$p(\alpha) \propto (\det I(\alpha))^{1/2} \quad (12)$$

gdzie:

$$I(\alpha) = -E \left[ \frac{\partial^2 \ln(p(y/\alpha))}{\partial \alpha^2} \right] \quad (13)$$

Ze wzoru (13) wynika, że informacja Fishera określona jest przez wartość oczekiwaną drugich pochodnych logarytmu funkcji wiarygodności. Odpowiednio dla rozkładu dwuparametrowego logarytm funkcji wiarygodności ma postać:

$$\Lambda = \ln L = \sum_{i=1}^n \ln(p(y_i/\alpha; \Theta_1, \Theta_2)) \quad (14)$$

$$I(\alpha) = \begin{vmatrix} E \left[ -\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \Theta_1^2} \right] & E \left[ -\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \Theta_1 \partial \Theta_2} \right] \\ E \left[ -\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \Theta_2 \partial \Theta_1} \right] & E \left[ -\frac{\partial^2 \Lambda}{\partial \Theta_2^2} \right] \end{vmatrix}$$

Odpowiednio wykorzystując otrzymane zależności możemy obliczyć momenty i kwantyle rozkładu parametrów rozkładu a następnie wyznaczyć kwantyle i momenty rozkładu aposteriori.

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony w opracowaniu sposób wykorzystania metody analizy ryzyka wspartej diagnostyką wibroakustyczną w podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych nawiązuje z jednej strony do definicji ryzyka i związanego z tym oszacowania prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia niepożądanego oraz estymacji rozległości i wartości strat jakie temu zdarzeniu mogą towarzyszyć,

z drugiej do możliwości wykorzystania rezultatów eksperymentu diagnostycznego w zadaniu zmniejszenia niepewności odnośnie estymacji parametrów aposteriorycznego rozkładu intensywności uszkodzeń. Wykorzystanie związku pomiędzy modelem bayesowskim a macierzą informacji Fishera umożliwia bezpośrednią aplikację wyników obserwacji diagnostycznej w bayesowskiej estymacji aposteriorycznego rozkładu oraz szacowania wejściowego rozkładu Jeffseys'a. Takie zastosowanie informacji diagnostycznej umożliwia rozwiązanie zagadnienia wyznaczania warunkowego rozkładu prawdopodobieństwa intensywności uszkodzeń na podstawie rezultatów uzyskanych w eksperymencie diagnostycznym.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2005-2008 jako projekt badawczy nr 4 T07B 030 29.*

## LITERATURA

- [1] YATOMI M. i inni, 2004, Application of Risk-Based Maintenance on Materials Handling Systems, *IHI Engineering Review*, vol. 37, No 2, str. 52-58.
- [2] ZAWISZA M., 2004, Wykorzystanie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej, rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.
- [3] RADKOWSKI S., ZAWISZA M., 2004, „Use of Vibroacoustic Signal for Evaluation of Fatigue-Related Damage of Toothed Gears”, *The 17th International Congress & Exhibition on Condition Monitoring And Diagnostic Engineering Management, COMADEM 2004*.
- [4] YANG W., 2001, Towards Dynamic Model-Based Prognostics for Transmission Gears, *SPIE Conference Proceedings*, vol. 4733, pp. 157-167.
- [5] WANG W., Wong A., 2002, Autoregressive Model Based Gear Fault Diagnosis, *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 124, pp. 172-179.
- [6] WANG P., VACHTSEVANOS G., 1999, Fault Prognosis Using Dynamic Wavelet Neural Networks, in *Maintenance and Reliability Conference, MARCON*.
- [7] JASIŃSKI M., 2004, Empiryczne modele w szczegółowej diagnostyce przekładni zębatej. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska.
- [8] BAR-SHALOM Y., LI X.R., KIRUBARAJAN T., 2001, Estimation with applications to tracking and navigation, John Wiley and Sons, INC 2001.
- [9] ADAMS D.E., 2002, Nonlinear Damage Models for Diagnostic and Prognosis in Structural Dynamic Systems, in *SPIE Conference Proceedings*, vol. 4733, pp 180-191.
- [10] CHELIDZE D., 2002, Multimode Damage Tracking and Failure Prognosis in Electromechanical system, in *SPIE Conference Proceedings*, vol. 4733, pp 1-12.
- [11] ZAWISZA M., 2003, Wykorzystanie informacji zawartej w sygnale wibroakustycznym do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia awarii w przekładni zębatej, Rozprawa doktorska Politechnika Warszawska.
- [12] RADKOWSKI S., ZAWISZA M., 2004, Naprężeniowo-drganowe modele diagnostyczne zmęzeniowych uszkodzeń kół zębatach, *3rd International Congress of Technical Diagnostics "DIAGNOSTICS'2004"*, Poznań 06-09.09.2004. PTDT, „Diagnostyka” vol. 30; tom 2, str. 85-88.
- [13] JEFFSEYS H., 1961, *Theory of Probability Data*, Oxford University Press, Oxford.

---

Prof. Stanisław RADKOWSKI profesor w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej kierownik zespołu naukowego Diagnostyki Technicznej i Analizy Ryzyka. Prezes Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej. Zainteresowania naukowe – analiza i ocena ryzyka technicznego, inżynieria bezpieczeństwa, wykorzystanie diagnostyki wibroakustycznej w zadaniach detekcji, identyfikacji i lokalizacji uszkodzeń niskoenergetycznych.



Dr inż. Maciej ZAWISZA adiunkt w Instytucie Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Warszawskiej, członek PTDT. Zainteresowania naukowe - diagnostyka maszyn ze szczególnym uwzględnieniem wykorzystania analizy sygnałów wibroakustycznych i naprężeń w detekcji zmęzeniowych stanów awaryjnych w przekładniach zębatach.

